



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Mécanique

Mohammed El Ganaoui and Patrick Bontoux

Foreword to more than a half century of Computational Fluid Dynamics (CFD)

Volume 350, Special Issue S1 (2022), p. 1-7


Online since: 5 November 2024

Issue date: 5 November 2024

Part of Special Issue: More than a half century of Computational Fluid Dynamics

Guest editor: Mohammed El Ganaoui (Professeur des Universités, Spécialiste :
Mécanique des Fluides et Transferts de Chaleur et de Masse, Université de Lorraine)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.251>

 This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*The Comptes Rendus. Mécanique are a member of the
Mersenne Center for open scientific publishing*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Foreword / *Avant-propos*

More than a half century of Computational Fluid Dynamics / *Plus d'un demi-siècle de mécanique des fluides numérique*

Foreword to more than a half century of Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Plus d'un demi-siècle de Mécanique des Fluides
Numériques (MFN) : avant-propos*

Mohammed El Ganaoui^{©,*,a} and Patrick Bontoux^{©,b}

^a Professeur des Universités, Université de Lorraine, Nancy-Metz, France

^b Directeur de Recherche CNRS (émérite), Université d'Aix-Marseille, France

E-mail: mohammed.el-ganaoui@univ-lorraine.fr (M. El Ganaoui)

Manuscript received and accepted 13 March 2024.

La version française suit la version anglaise

The present issue entitled “More than a Half Century of Computational Fluid Dynamics (CFD)” explores several aspects of a discipline that has impacted both theoretical knowledge and applications in the field of fluid physics.

Fluid mechanics, starting from its nascent stage [1–3], has managed to address the fundamental aspects of knowledge, as well as practical applications, through global international cooperative efforts, even during periods of conflict, to arrive at its current state where its contribution is of considerable benefits to human society [4]. At the same time, Computational Fluid Dynamics (CFD), a natural extension of theoretical and experimental fluid mechanics, coupled with Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI), is incubating a path to address practical problems of complex flows, as discussed here [5].

CFD has gradually established itself as an indispensable means of predicting the phenomena of fluid physics. It provides a means of integrating the cost-effective optimization of objective functions for system designs. It has benefited extensively from the impressive evolution of computer capabilities, as hypothesized by Moore's law, and from significant developments in novel algorithms for discretization of differential terms and advanced methods for solving matrices of

*Corresponding author

algebraic equations. Furthermore, computer architecture developments in vector, parallel, and cloud computing and the latest advances in ML and AI have provided considerable momentum for the application of CFD. This has led to the development of numerous software tools that enable scientists to advance their understanding of the physics of phenomena and meet the complex demands of a continually expanding industrial sector. It is worth noting that CFD has been an excellent example of collaborative efforts by both researchers and developers from academia and industry.

CFD has also become firmly anchored in the field of modern engineering practice as an essential component, allowing for in-depth understanding and optimization of systems based on fluid behavior, such as aeronautics or meteorology [6]. Not to mention the coupling of the dynamic field with other fields ensures physical and applicative completeness to the problems addressed. Fluid physics in microgravity is an example of the outcome of the complementarity between CFD and experimental physics to leverage the benefits of the space environment for terrestrial applications impacting materials, energy, and health [7].

This issue pertains to the evolution of CFD and its significant contributions over the last half century, as captured by the specialists and practitioners who were active during this rapidly changing era. Their perspectives on this issue contribute to creating a comprehensive yet fair and balanced image of a discipline that has benefited from the rapid convergence of numerous international efforts.

CFD also presents itself as an important avenue to address the open problem of turbulence, which is notably listed as one of the seven most important unsolved Millennial Prize problems of mathematics by the Clay Mathematical Institute [8].

It is important to realize that approximations have played a significant role in advancing CFD modeling to understand the essential aspects of physics and benefit, in retrospect, from the analysis of phenomena that led to major breakthroughs (Soret effect, Dufour effect, etc.). One of the most famous approximations, that of Boussinesq, receives detailed attention in this thematic issue [9]. An example of coupled stratified radiative transfer with fluid mechanics is described in this thematic issue [10], and the development of multiphase formulations for modeling forest fires [11].

Another synthesis concerning experimental and numerical approaches and bridging the notions of continuous and discrete meshing is the visible manifestation of the contribution of numerical analysis to the discipline, which is included in this issue [12]. A contribution ranging from fundamental aspects to geophysics and astrophysics [13] is also presented. Indeed, continuous and discrete aspects have marked the forefront of CFD advancement and continue to do so. Furthermore, a recent review about the evolution of CFD toward an integrated discrete approach based on the original mathematical modeling of generic equations is also presented in this issue [14].

Meshing, as a significant manifestation of the discrete aspect, has always been the subject of extensive scientific exchanges. An excellent paper translates a debate almost as old as CFD itself to address the compressible Navier–Stokes equations. Although theoretically unresolved, software developers have provided some evidence in favor of unstructured meshes [15]. The meshing topic continues to address new problems amenable to practical and theoretical developments, bringing mathematical and physical communities closer. One contribution discusses recent advances in domain decomposition methods for large-scale saddle point problems [16]. The results suggest that this combined approach (meshing, numerical algorithms modeling efficient computational implementation) is highly effective for practical applications in aeronautical and maritime design [17]. Significant attention is given to the numerical methods that have accompanied the development of CFD. Classical approaches, often linked to curvilinear meshing, are instinctively associated with the finite element method (FEM), which has enjoyed prac-

tical use by engineers since the 1940s. This method, first described by (Leibnitz 1646–1716), has benefited from a methodological formalism and rigorous mathematical framework that found its foundations in the variational approach (Galerk in 1915, Trefftz in 1926).

The Finite Volume Method (FVM), which had its origins at Imperial College under the guidance of Professor Spalding [18–20] is an alternative formalism to address the problems of fluid flow based on flux and mass balance in discrete volumes. It has benefited from further developments and practical applications [21, 22], and the formalism of a rigorous mathematical framework [23]. In this issue, a contribution concerning the recent developments of the method is also presented [23].

In the 1980s, lattice Boltzmann methods (LBM) emerged, which are finding increasing interest and offer advantages in representing certain families of flows. LBM relies on theoretical tools imported from the kinetic approach of Boltzmann from the French mathematical school. An excellent review of the LBM methods is included in this issue [24].

Some of these developments in CFD are described in the series of conferences “Discrete Simulation of Fluid Dynamics (DSFD)” that began in 1986 at Los Alamos at the initiative of Gary D. Doolen and had its 23rd edition in Paris in 2014. Among the many topics addressed in this conference series are LBM, dissipative particle dynamics, smooth particle hydrodynamics, Monte Carlo, and other methods.

It should be noted that the contributions derived from high-precision numerical approximation, such as Hermitian or compact finite differences of the 4th and 6th order, spectral methods of tau type, decomposition collocation based on Fourier developments, Chebyshev polynomials, and others, saw their initial rise, particularly with vector supercomputers (such as Cray), for various applications in CFD. However, these developments do not appear directly in this thematic issue of the Proceedings of the French Academy of Sciences.

An original illustration of 35 years of aerodynamics and insect flight, described in a contribution by [25], paves the way for future topical connections. Now, a parallel can be drawn between the fluidity of flows and the presence of CFD in all springs of scientific activity, often implicitly benefiting recent domains where automation and digitalization combine and manifest in progress made in hardware, software, big data, AI, IoT, and virtual and augmented reality. The range of tools offered to an engineer will enable them to access a level of visualization and perception of interaction and dynamic object manipulation far beyond what is currently available.

In brief, this testimony of half a century of coupling between the physics of fluids, the physical world of applications, and the digital universe serves as a true bridge between the extraordinary development that fluid understanding has experienced and the potential that artificial intelligence brings to the dynamics of tomorrow.

Version française

Le présent numéro spécial, intitulé *Plus d'un demi-siècle de Mécanique des Fluides Numérique (MFN)*, explore des années 1950 à nos jours plusieurs facettes d'une discipline qui a marqué autant les savoirs abstraits que les champs applicatifs, à savoir la physique des fluides.

En effet, la mécanique des fluides [1–3] a transcendé et invité à une coopération active les thématiques fondamentales des savoirs, et évolué sur le plan international au travers des conflits mondiaux pour perfectionner aujourd'hui des réalisations majeures, pour le plus grand bien de la société humaine [4]. La MFN est à la fois le prolongement naturel de la mécanique des fluides théorique et expérimentale et une voie d'incubation de l'intelligence artificielle pour les écoulements complexes, largement évoquée de nos jours [5].

La MFN s'est imposée progressivement comme une voie incontournable de prévision des phénomènes de la physique des fluides, notamment en intégrant l'optimisation à moindre coût de

la conception des objets et des systèmes. Elle a bénéficié conjointement de la loi de Moore pour l'évolution impressionnante des capacités des ordinateurs, mais aussi du développement algorithmique, et du calcul vectoriel, parallèle et intensif qui prolonge les évolutions du matériel informatique. Ceci a permis le développement de nombreux logiciels, permettant à des scientifiques de faire avancer la compréhension des phénomènes et de répondre aux attentes complexes d'un secteur industriel en continuelle expansion. Notons d'ailleurs que ces scientifiques n'étaient pas toujours formés aux mathématiques appliquées ou à l'analyse numérique.

La MFN est également devenue une composante essentielle de l'ingénierie moderne, et a permis une compréhension approfondie et une optimisation des systèmes basés sur le comportement des fluides, comme en aéronautique ou en météorologie [6], ou encore le couplage du champ dynamique avec d'autres champs, assurant la complétude physique et applicative aux problèmes abordés. La physique des fluides en microgravité fournit un exemple de retombée de la complémentarité entre MFN et mécanique des fluides expérimentale, associées pour tirer profit des avantages de l'environnement spatial pour les applications terrestres impactant matériaux, énergie, santé, etc. [7].

Dans ce numéro, on trouvera des contributions importantes sur l'évolution de la MFN, rédigées par des spécialistes et des témoins d'une époque en pleine mutation. Leurs regards croisés dans ce numéro contribuent à la formation d'une image non exhaustive, mais juste et équilibrée, d'une discipline qui a bénéficié de la convergence rapide de l'effort international.

En premier lieu, les approximations ont joué un rôle important pour faire continuellement évoluer la modélisation, dans le but de mieux comprendre certains aspects essentiels de la physique et d'apporter un éclairage, *a posteriori* et via leur prise en compte de l'analyse, à des phénomènes mineurs qui ont ensuite conduit à des avancées majeures (effet Soret, effet Dufour, ...). Une des plus célèbres approximations, celle de Boussinesq, bénéficie d'une note détaillée dans ce numéro thématique [9]. Un exemple de transfert radiatif stratifié couplé aux équations de la mécanique des fluides est décrit dans ce numéro thématique [10] de même que le développement de formulations multiphasiques appliquées à la modélisation des incendies de forêt [11].

La MFN se présente comme une des pistes de réponse au problème de la turbulence, qui reste encore ouvert pour ce siècle, au point de compter parmi les sept problèmes retenus par la fondation Clay [8]. Une autre synthèse concernant les approches expérimentales et numériques et faisant le lien entre les notions de continu et de discret (le maillage étant la manifestation visible de l'apport de l'analyse numérique à la discipline) figure dans ce numéro [12], qui comprend également une contribution retraçant l'histoire de la turbulence, depuis son aspect fondamental jusqu'à la géophysique et l'astrophysique [13].

De fait, les aspects continu et discret ont marqué le front d'avancement de la MFN et continuent à le faire. Une revue récente suggérant l'évolution de la MFN vers une approche discrète intégrée, basée sur une modélisation mathématique originale des équations génériques, est d'ailleurs apportée dans ce numéro [14].

Le maillage, comme importante manifestation du discret, a toujours fait l'objet de grands échanges scientifiques : un excellent papier revient sur ce débat presque aussi ancien que la MFN, pour aborder le modèle de Navier–Stokes compressible [15]. Il montre que bien que cela ne puisse être tranché théoriquement, les développeurs des logiciels ont apporté un arbitrage (de fait) en faveur des maillages non structurés.

La thématique du maillage continue à poser de nouveaux problèmes, susceptibles d'engendrer des développements pratiques et théoriques et de rapprocher encore davantage les communautés mathématique et physique. Une contribution aborde le progrès récent dans les méthodes de décomposition de domaine, pour le problème du point de selle à grande échelle [16].

Les résultats suggèrent que cette approche combinée (maillage, algorithmes numériques, mo-

délisation, mise en œuvre informatique efficace) est d'une grande efficacité industrielle dans la conception aéronautique et maritime [17]. Une place importante est accordée aux méthodes numériques qui ont accompagné le développement la MFN. Des approches classiques, souvent liées au maillage curviligne, sont associées à la méthode des éléments finis. Cette technique a bénéficié d'un usage pratique par des ingénieurs dès les années 40, avant de profiter d'un formalisme méthodologique et d'un cadre mathématique rigoureux, fondé sur l'approche variationnelle (Galerkin en 1915 et Trefftz en 1926), et même, sur les théories d'auteurs encore plus anciens (Leibnitz 1646–1716).

La Méthode des Volumes Finis (MVF), qui a vu le jour à l'Imperial College sous la direction du professeur Spalding [18–20], est un formalisme alternatif permettant d'aborder les problèmes d'écoulement des fluides, basé sur l'équilibre des flux et de la masse dans des volumes discrets. Il a bénéficié de développements ultérieurs et d'applications pratiques [21, 22], ainsi que du formalisme d'un cadre mathématique rigoureux et fécond [23]. Dans ce numéro, une contribution concernant les développements récents de la méthode est également présentée [23].

Les années 80 virent apparaître les méthodes dites de gaz sur réseaux (LBM), qui connaissent à présent un intérêt croissant et présentent des avantages de représentation pour les écoulements. Sur ce sujet, la série de conférences « Discrete Simulation of Fluid Dynamics (DSFD) » a commencé en 1986 à Los Alamos à l'initiative de Gary D. Doolen, et a connu 23^{ème} édition à Paris en 2014. Parmi les nombreux sujets traités dans cette série de conférences : les schémas de Boltzmann sur réseau, particulières dissipatives, l'hydrodynamique particulière, les méthodes de Monte Carlo, etc. Les schémas de Boltzmann sur réseau s'appuient sur des outils théoriques importés de l'approche cinétique de Boltzmann, un thème de prédilection pour l'école mathématique française. Une excellente revue des méthodes LBM figure dans ce numéro [24].

Mentionnons que les apports dérivés de la précision supérieure de l'approximation numérique (acquise avec les Méthodes aux Différences Finies hermitiennes ou compactes du 4^{ème} et 6^{ème} ordre, les méthodes spectrales de type tau, ou la collocation en décomposition sur la base des développements de Fourier, des polynômes de Chebyshev et autres) ont débuté leur essor en particulier grâce aux supercalculateurs vectoriels (de type Cray), même si leurs développements n'apparaissent pas directement dans ce numéro thématique *Comptes Rendus Mécanique*.

Enfin, une illustration originale sur trente-cinq ans d'aérodynamique et d'étude du vol des insectes, décrite dans une contribution [25], tente d'élargir le sujet à de futures nouvelles thématiques. Désormais, un parallèle est possible entre la fluidité des écoulements et la prise en compte de la MFN dans tous les ressorts de l'activité scientifique, souvent de manière implicite, profitant aux domaines récents dans lesquels l'automatique et le numérique s'associent et se manifestent dans les progrès réalisés en matériel, logiciels, grands volumes de données, IA, IoT, et réalités virtuelle et augmentée. L'étendu des outils offerts à un ingénieur lui permettra dorénavant d'accéder à un niveau de visualisation et de perception des possibilités d'interaction et de manipulation des objets de manière dynamique, ce qui compense l'exigence en abstraction en donnant corps à cette dernière.

Ainsi, ce témoignage sur un demi-siècle de couplage entre la physique des fluides et l'univers numérique souhaite être une vraie passerelle entre l'essor extraordinaire qu'a connu la compréhension des fluides en écoulement et la promesse qu'apporte l'intelligence artificielle pour la dynamique de demain.

Acknowledgments/Remerciements

Thanks to the reviewers who worked on this issue : G. Accary, R. Bennacer, H. Ben Hamed, O. Bouloumou, PB, J.P. Bonnet, J.P. Caltagirone, A. Dervieux, G. Destefano, F. Dubois, M. El Ganaoui, L. El Haj, J.P. Fontaine, T. Gallouet, M. Gander, S. Houat, F. Hubert, L. Halpern, J. Hristov,

M. Lappa, A. Mataoui, S. Meradji, D. Meiron, R. Moreau, D. Morvan, B. S. Morsli, Morrone, M.C. Neel, J. M. Nunzi, G. Pezzella, O. Pironneau, A. Saad, A. Runchal, R. Schiestel, S. Succi, J.L. Dufresne, S. Valcke, G. Krinner, B. Joseph, T. Truman Clark, K. Schneider, M. Visonneau, C. Maliska, P. Sparlat, F. Menter, M. Leschziner, B. Launder, A. Filkov, E. Mueller, C. Clements, Y. Rogaume, A. Ouahda.

To the editorial service and staff : J.-B. Leblond, A. Lopes, J. Fabre, L. Pons.

This foreword is also an opportunity to recall that this issue was partly concocted during the pandemic crisis. Very affected by the support of colleagues and particularly Patrick Bontoux during the period of hospitalization that I underwent. This project was a great moral support to me (MEG).

We have lost during this work very eminent colleagues from Marseille and other places in the Fluid Mechanics field. Pierre Haldenwang (5 December 2021), Marcel Lesieur (22 March 2022), Abdelhak Ambari (26 April 2022) and Jean Pierre Guibergia (3 July 2023).

May this topical issue of *Comptes Rendus Mécanique* be a kind of continuation of their dedication to fluid mechanics and the love they communicated concerning this matter for their students.

References/Références

- [1] H. Bénard, “Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en régime permanent”, *Ann. Chim. Phys.* **23** (1901), p. 62-144 (thèse de doctorat ès sciences de la faculté des sciences de Paris).
- [2] G. Eiffel, “Sur la résistance des sphères dans l’air en mouvement”, *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **155** (1912), p. 1597-1599.
- [3] L. Rayleigh, “On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the underside”, *Phil. Mag.* **32** (1916), p. 529-546.
- [4] F. Charru, “La mécanique des fluides en France dans la première moitié du xxe siècle”, *C. R. Méc.* **350** (2023), p. 1-39 (Online first).
- [5] A. Runchal, “Evolution of CFD as an engineering science. A personal perspective with emphasis on the finite volume method”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-26 (Online first).
- [6] A. Voldoire, “Climate models”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-14 (Online first).
- [7] R. Prud’homme, M. El Ganaoui, “Foreword”, *C. R. Méc.* **332** (2004), no. 5–6, p. 319-322.
- [8] Clay Institute, *Millennium Prize Problems—Navier–Stokes Equation*, claymath.org, Clay Mathematics Institute, 2017, retrieved 2017-04-02.
- [9] M. Lappa, “Incompressible flows and the Boussinesq approximation: 50 years of CFD”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-22 (Online first).
- [10] F. Golse, O. Pironneau, “Stratified radiative transfer for multidimensional fluids”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-15 (Online first).
- [11] D. Morvan, G. Accary, S. Meradji, N. Frangieh, “Fifty years of progress in wildland fire modelling: from empirical to fully physical CFD models”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-9 (Online first).
- [12] J. P. Bonnet, “Experimental and computational fluid dynamics: decades of turbulent EFD/CFD complementarity”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-14 (Online first).
- [13] C. Cambon, A. A. Laguna, Y. Zhou, “CFD for turbulence: from fundamentals to geophysics and astrophysics”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-20 (Online first).
- [14] J.-P. Caltagirone, “Evolution of CFD numerical methods and physical models towards a full discrete approach”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-10 (Online first).
- [15] A. Dervieux, “To be structured, or unstructured, fifty years of slings and arrows”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-6 (Online first).
- [16] F. Nataf, P. H. Tournier, “Recent advances in domain decomposition methods for large-scale saddle point problems”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-15 (Online first).
- [17] M. Visonneau, G. Deng, E. Guilmineau, A. Leroyer, P. Queutey, J. Wackers, “Computational fluid dynamics for naval hydrodynamics”, *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-19 (Online first).
- [18] A. K. Runchal, M. Wolfshtein, “A finite-difference procedure for the integration of the Navier–Stokes equations”, in *Conference on Computational Methods in Fluids*, University of Strathclyde, Scotland, 1966. Also available as Imperial College Technical Note, Mech. Eng. Dept, SF/TN/1, July 1966.
- [19] A. K. Runchal, D. B. Spalding, M. Wolfshtein, “Numerical solution of the elliptic equations for the transport of vorticity, heat and matter in two-dimensional flows”, *Phys. Fluids* **12** (1969), no. II, p. 21-28.

- [20] S. V. Patankar, D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat transfer by forced convection through 2-dimensional uniform-property turbulent boundary layers on smooth impermeable walls", *A.I. Chem. E., Chem Eng. Progr.* **62** (1966), no. 7, p. 80.
- [21] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing/Taylor & Francis, Boca Raton, 1980, ISBN 0-89116-522-3.
- [22] K. Hanjalic, B. E. Launder, R. Schiestel, "Multiple-time-scale concepts in turbulent transport modeling", in *Von Karman Inst. for Fluid Dyn. Meas. and Predictions of Complex Turbulent Flows*, vol. 1, Imperial College of Science and Technology, London, 1980, p. 35.
- [23] R. Eymard, T. Gallouët, R. Herbin, "Finite volume methods", in *Handbook of Numerical Analysis* (P. G. Ciarlet, J. L. Lions, eds.), vol. VII, North-Holland, Amsterdam, 1991, p. 713-1020.
- [24] S. Succi, "Lattice fluid dynamics: thirty-five years down the road", *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-12 (Online first).
- [25] T. Engels, H. Truong, M. Farge, D. Kolomenskiy, K. Schneider, "Computational aerodynamics of insect flight using volume penalization", *C. R. Méc.* **350** (2022), p. 1-20 (Online first).